

Исследование влияния температурного режима пожара на эффективность вспучивающегося огнезащитного покрытия, предназначенного для огнезащиты стальных конструкций

Татьяна Юрьевна Еремина¹, Денис Александрович Минайлов²✉

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

² Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Московская обл., г. Балашиха, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Применение вспучивающегося огнезащитного покрытия (далее ВОП) обосновывается разработкой проекта огнезащиты, учитывающего данные по его огнезащитной эффективности, оцениваемой в условиях воздействия стандартного температурного режима, применение которых может привести к закладыванию в проект завышенного запаса по огнестойкости или к недооценке теплового воздействия на стальные строительные конструкции с огнезащитой ВОП в условиях реального пожара.

Цели и задачи. Цель исследования — оценить влияние температурного режима пожара на эффективность ВОП. Для решения поставленной цели были решены следующие задачи: произведена оценка температурного режима пожара в помещении при различной пожарной нагрузке на примере складского здания; проведены эксперименты по оценке влияния различного теплового потока, приведенной толщины металла и толщины ВОП на его эффективность по плану полного факторного эксперимента типа 2.

Методы. Для математического моделирования реальных температурных пожаров применялся программный комплекс Fire Dynamics Simulator (FDS), реализующий полевою (дифференциальную) математическую модель. Для исследования влияния полученных температурных режимов пожара на эффективность ВОП были проведены эксперименты по плану полного факторного эксперимента типа 2. В качестве образцов для испытаний были выбраны металлические пластины из углеродистой стали размерами 100 × 100 мм с приведенной толщиной 3 и 4,5 мм и окрашенные однокомпонентным ВОП на органической основе толщиной 0,25 и 0,5 мм. Для оценки влияния теплового потока применялась радиационная панель с возможностью регулирования лучистого теплового потока плотностью от 10 до 50 кВт/м².

Результаты и обсуждение. В ходе проведения численных экспериментов в программном комплексе FDS установлено, что тепловое воздействие, оказываемое на стальные строительные конструкции во время пожара, может существенно отличаться от стандартного температурного режима как в большую, так и в меньшую сторону. Результаты эксперимента показали, что на время прогрева испытательных образцов наибольшее влияние из рассматриваемых факторов (величина теплового потока, приведенная толщина металла, толщина ВОП) оказала величина теплового потока, так как был получен наибольший по абсолютной величине коэффициент уравнения регрессии.

Вывод. Предположение о возможной недооценке теплового воздействия при «стандартном» температурном режиме на огнестойкость стальных строительных конструкций с огнезащитой ВОП подтвердилось при проведении испытаний.

Ключевые слова: компьютерное моделирование; Fire Dynamics Simulator (FDS); огнестойкость стальных строительных конструкций; тепловой поток; пожарная нагрузка; приведенная толщина металла

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект: Теоретическое и экспериментальное проектирование новых композиционных материалов для обеспечения безопасности при эксплуатации зданий и сооружений в условиях техногенных и биогенных угроз № FSWG-2020-0007)

Для цитирования: Еремина Т.Ю., Минайлов Д.А. Исследование влияния температурного режима пожара на эффективность вспучивающегося огнезащитного покрытия, предназначенного для огнезащиты стальных конструкций // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 2. С. 44–58. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.02.44-58

✉ Минайлов Денис Александрович, e-mail: minailov-denis@mail.ru

Research of the effect of fire temperature regime on the effectiveness of intumescent coating designed for fire protection of steel structures

Tatyana Yu. Eremina¹, Denis A. Minailov²✉

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

² All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The usage of intumescent coating (hereinafter referred to as IC) is justified by the development of a fire protection project, taking into account the data on its fire protection efficiency, estimated under the influence of standard temperature conditions, the usage of which can lead to overestimating the fire resistance margin in the project or underestimating the thermal impact on the steel building structures with IC fire protection in conditions of a real fire.

Aims and purposes. The purpose of the study is to evaluate the effect of fire temperature conditions on the effectiveness of IC. To achieve this goal, the following tasks were carried out: a temperature mode of fire in a building under different fire loads by the example of a warehouse building was estimated; experiments to estimate the influence of different heat fluxes, reduced thickness of metal and IC thickness on its effectiveness by the full factor experiment of the type 2 were conducted.

Methods. To mathematically simulate real temperature fires, the Fire Dynamics Simulator (FDS) software package, which implements a field (differential) mathematical model, was used. To study the effect of the obtained fire temperature regimes on the effectiveness of IC, experiments were carried out according to the plan of a complete factor experiment type 2. The test specimens were carbon steel metal plates with dimensions of 100 × 100 mm with reduced thickness of 3 and 4.5 mm and painted with 0.25 and 0.5 mm organic-based single-component IC. A radiant heat flux panel with a radiant heat flux density of 10 to 50 kW/m² was used to assess the effects of heat flux.

Results and discussion. In the course of numerical experiments in the FDS software package, it was found that the thermal impact on steel building structures during a fire can differ significantly from the standard temperature regime, both upwards and downwards. The results of the experiment showed that the heating time of the test samples had the greatest influence of the actors under consideration (the value of the heat flux, the reduced thickness of the metal, the thickness of IC) had the value of the heat flux, as the largest absolute value of the regression equation was obtained.

Conclusion. The assumption of possible underestimation of the thermal effect under “standard” temperature conditions on the fire resistance of steel building structures with IC fire protection was confirmed by the tests.

Keywords: computer modelling; Fire Dynamics Simulator (FDS); fire resistance of steel building structures; heat flux; fire load; reduced thickness of metal

Acknowledgments: the work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project: Theoretical and experimental design of new composite materials for safe operation of buildings and structures under conditions of technogenic and biogenic threats No. FSWG-2020-0007)

For citation: Eremina T.Yu., Minailov D.A. Research of the effect of fire temperature regime on the effectiveness of intumescent coating designed for fire protection of steel structures. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(2):44-58. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.02.44-58 (rus).

✉ Denis Aleksandrovich Minailov, e-mail: minailov-denis@mail.ru

Введение

В настоящее время строительство и эксплуатация зданий на стальном каркасе, согласно статистическим данным МЧС России¹, сопровождается систематическим проявлением пожароопасных ситуаций с гибелью людей и значительным материальным ущербом (табл. 1).

Сегодня для обеспечения предела огнестойкости стальных строительных конструкций зданий и сооружений различного функционального назначения

широко используют различные вспучивающиеся огнезащитные покрытия (ВОП) [1–4] (рис. 1).

Для обоснования применения ВОП согласно СП 2.13130.2020² разрабатывается проект огнезащиты, учитывающий экспериментальные данные по огнезащитной эффективности ВОП, а также результаты прочностных и теплотехнических расчетов стальных строительных конструкций с ВОП. Проведение теплотехнических расчетов стальных строительных конструкций с ВОП производится

¹ Пожары и пожарная безопасность в 2021 году : стат. сб. Балашиха : ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2022. 114 с.

² СП 2.13130.2020. Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты.

Таблица 1. Статистические данные пожаров в промышленных и общественных зданиях
Table 1. Statistical data on fires in industrial and public buildings

Назначение зданий Purpose of buildings	Количество пожаров, ед./% от общего количества Number of fires, units/% of the total number Прямой материальный ущерб, тыс. руб./% от общего ущерба Direct material damage, thousand rubles/% of total damage Погибло, чел./% от общего количества погибших Killed, people/% of the total number of deaths									
	2017		2018		2019		2020		2021	
Производственные Production	2786 974 317 59	2,10 7,08 0,75	2813 1 343 463 71	2,13 8,66 0,90	3546 2 089 945 72	0,75 11,50 0,84	3438 7 132 712 83	0,78 34,17 1,00	3589 1 783 532 110	0,92 10,98 1,30
Складские Warehouse	1427 2 749 853 25	1,07 19,97 0,32	1402 817 317 20	1,06 5,27 0,25	1589 5 057 354 23	0,34 27,83 0,27	1501 3 458 591 16	0,34 16,57 0,19	1462 2 848 908 17	0,37 17,53 0,20
Предприятия торговли Trade enterprises	2688 1 784 318 17	2,02 12,96 0,22	2632 3 917 681 11	2,00 25,25 0,14	2754 1 110 042 2	0,58 6,11 0,02	2620 845 755 10	0,60 4,05 0,12	2668 1 265 341 14	0,68 7,79 0,17
Сервисное обслуживание населения Public Service	968 226 177 7	0,73 1,64 0,09	988 250 898 5	0,75 1,62 0,06	1194 191 689 8	0,25 1,05 0,09	1143 259 565 8	0,26 1,24 0,10	1155 154 938 4	0,30 0,95 0,05
Административные Administrative	740 130 095 12	0,56 0,94 0,15	799 175 100 15	0,61 1,13 0,19	867 145 677 13	0,18 0,80 0,15	855 156 348 3	0,19 0,75 0,04	805 94 606 10	0,21 0,68 0,12
Для культурно- досуговой деятельности For cultural and leisure activities	233 76 792 3	0,18 0,56 0,04	272 69 175 61	0,21 0,45 0,77	351 85 793 1	0,07 0,47 0,01	278 467 614 1	0,06 2,24 0,01	252 79 117 0	0,06 0,49 0,00

на основании теплотехнических характеристик ВОП, полученных по результатам стандартных огневых испытаний. В настоящее время проведение обязательных огневых испытаний с целью определения огнезащитной эффективности ВОП осуществляется по ГОСТ Р 53295–2009³ с Изменениями 1 в условиях воздействия «стандартного температурного режима» по ГОСТ 30247.0⁴, по результатам которых путем решения обратной задачи теплопроводности можно получить теплотехнические характеристики ВОП. ГОСТ Р 53295–2009² также допускает проведение огневых испытаний ВОП на добровольной основе в условиях воздействия медленно развивающегося (тлеющего) пожара. Однако производители ВОП, как правило, не проводят таких испытаний, так как они носят рекомендательный характер.

³ ГОСТ Р 53295–2009. Средства огнезащиты для стальных конструкций. Общие требования. Метод определения огнезащитной эффективности. ГОСТ 30247.0–94.

⁴ ГОСТ 30247.0. Конструкции строительные. Методы испытания на огнестойкость. Общие требования.

Из литературы [1, 4–17] известно, что на огнезащитную эффективность ВОП как при проведении лабораторных испытаний, так и при эксплуатации могут влиять различные факторы и воздействия, основные из которых условно можно разделить на слабо воздействующие, средне воздействующие и сильно воздействующие (табл. 2).

При разработке проекта огнезащиты стальных строительных конструкций для каждого объекта защиты учесть влияние действующих на объекте факторов воздействия на огнезащитную эффективность ВОП по данным стандартных огневых испытаний весьма проблематично, так как для этой цели нужны зависимости изменения огнезащитной эффективности от влияния действующих факторов. Поэтому для получения таких зависимостей нужно проведение дополнительных огневых испытаний по расширенной программе, требующей значительных затрат, сил и средств. При этом при проведении испытаний факторы воздействия должны соответствовать определенным требованиям, т.е. они должны быть управляемыми (значение нужного фактора должно под-

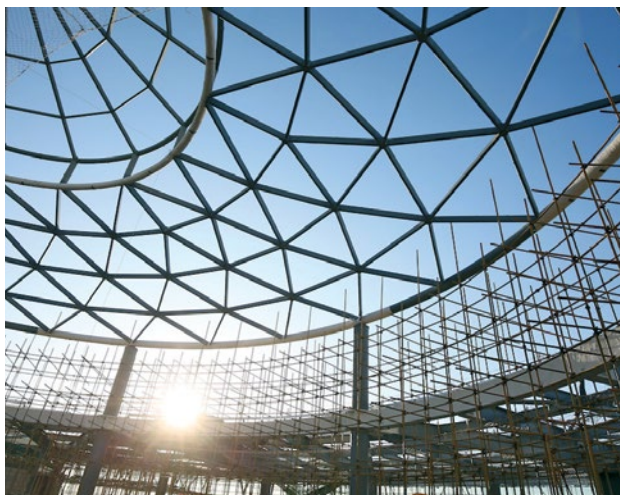
*a**b**c**d*

Рис. 1. Применение ВОП для огнезащиты стальных строительных конструкций: *a* — складские здания; *b* — торговые центры; *c* — спортивные сооружения; *d* — железнодорожные станции
Fig. 1. IC applications for fire protection of steel building structures: *a* — warehouse buildings; *b* — shopping malls; *c* — sports facilities; *d* — railway stations

держиваться постоянным в течение всего опыта), однозначными, совместимыми, независимыми при обеспечении требуемой точности измерений факторов. Несоответствие вышеперечисленным требованиям делает невозможным получение достоверных зависимостей огнезащитной эффективности от факторов воздействия, действующих на объекте защиты, при проведении огневых испытаний. При планировании эксперимента необходимо составить список факторов, которые могут оказать влияние на огнезащитную эффективность ВОП на объекте защиты и которые не учитывались при проведении стандартных огневых испытаний по ГОСТ Р 53295–2009².

Из табл. 1 следует, что при эксплуатации ВОП на объекте защиты основными факторами, воздействующими на огнезащитную эффективность, являются температурно-влажностные условия эксплуатации и температурный режим реального пожара. Оценка

влияния температурно-влажностных условий эксплуатации на огнезащитные свойства ВОП на объекте защиты оценивается в основном при помощи разрушающих методов контроля [18, 19]. Данные методы позволяют контролировать огнезащитные свойства ВОП в течение всего срока его службы с некоторыми допущениями. Влияние температурного режима пожара на огнезащитную эффективность при применении этих методов контроля не учитывается.

Цель настоящего исследования — оценка влияния температурного режима пожара на эффективность ВОП, предназначенного для огнезащиты стальных конструкций.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- оценить температурный режим пожара в помещении при различной пожарной нагрузке на примере типового складского здания;

Таблица 2. Сравнение факторов и воздействий, влияющих на огнезащитную эффективность ВОП
Table 2. Comparison of factors and influences affecting the fire-retardant effectiveness of IC

Фактор воздействия Impact factor	Степень влияния факторов и воздействий на ВОП Degree of influence of factors and influences on IC		
	Слабо Weak	Средне Middle	Сильно Strong
<i>При лабораторных испытаниях In laboratory tests</i>			
Способ нанесения (ручной, механизированный) Method of application (manual, mechanized)	+	–	–
Наличие защитно-декоративного покрытия Availability of protective and decorative coating	–	+	–
Приведенная толщина металла Reduced metal thickness	–	+	–
Толщина покрытия Coating thickness	–	–	+
Коэффициент вспучивания (химический состав покрытия) Swelling coefficient (chemical composition of the coating)	–	–	+
Адгезия (марка грунта, химический состав, качество поверхности) Adhesion (soil grade, chemical composition, surface quality)	–	–	+
Стабильность пенококса (плотность, устойчивость к осыпанию, образование трещин, «сползание») Stability of foam cox (density, resistance to crumbling, cracking, “sliding”)	–	–	+
<i>При эксплуатации (хранение, нанесение, срабатывание при пожаре) During operation (storage, application, fire response)</i>			
Условия хранения и транспортировки Storage and transportation conditions	–	–	+
Температурно-влажностные условия эксплуатации Temperature and humidity operating conditions	–	–	+
Срок годности Shelf life	–	–	+
Срок эксплуатации Lifetime	–	–	+
Температурный режим реального пожара Temperature regime of a real fire	–	–	+

- провести эксперименты по оценке влияния теплового потока пожара, приведенной толщины металла и толщины ВОП на эффективность ВОП;
- по результатам экспериментов построить математическую модель зависимости эффективности ВОП от величины теплового потока, толщины ВОП, приведенной толщины металла.

Методы

Моделирование температурных режимов реальных пожаров осуществлялось при помощи программного комплекса Fire Dynamics Simulation (FDS), реализующего полевую математическую модель. В качестве объекта исследования было выбрано типо-

вое складское здание размерами 12×12 м и высотой 6,5 м. Несущие элементы здания — стальные конструкции. Покрытие — плоская кровля на металлических балках и фермах покрытия. В здании предусмотрены ворота размером 4×4 м в количестве 2 шт. и входная дверь размером 1×2 м. В стенах здания размещены 32 окна размерами $0,7 \times 1$ м [20].

Объектом, моделирующим пожарную нагрузку в программном комплексе FDS, принималось вентиляционное отверстие. Для оценки температуры на поверхности стальных конструкций были установлены датчики (термопары) с шагом 1 м, также измерялась среднеобъемная температура на высоте 4,7–6,5 м. При проведении расчетов ворота здания были открыты, окна закрыты.

В качестве пожарной нагрузки по справочным данным⁵ [21] были приняты: промтовары (текстильные изделия); резинотехнические изделия (резина и изделия из нее); склад льноволокна; склад оргстекла; этиловый спирт; кабели и провода (0,75 (АВВГ, АПВГ, ТПВ) + 0,25 (КПРТ, ПР, ШРПС)); хлопок разрыхленный; склад бумаги в рулонах; тара (древесина, картон, полистирол); радиоматериалы, индустриальное масло, склад хлопка в тюках.

Для исследования влияния температурного режима пожара на эффективность ВОП были поставлены эксперименты по плану ПФЭ 2^{3,6}, причем каждый эксперимент повторялся по три раза. В качестве рассматриваемых факторов, влияющих на эффективность ВОП, были выбраны: тепловой поток, кВт/м²; приведенная толщина металла, мм; толщина ВОП, мм. Каждый из анализируемых факторов рассматривался лишь на двух фиксированных уровнях (верхнем, обозначаемом знаком «+», и нижнем, обозначаемом знаком «-»):

z_1 — тепловой поток, кВт/м²: $z_1^- = 40$, $z_1^+ = 50$;

z_2 — приведенная толщина металла, мм: $z_2^- = 3$, $z_2^+ = 4,5$;

z_3 — толщина огнезащитного вспучивающегося покрытия, мм: $z_3^- = 0,25$, $z_3^+ = 0,5$.

Матрица планирования проведения экспериментов указана в табл. 3.

Построение математической модели (функции $y = f(z_1, z_2, z_3)$), называемой уравнением регрессии

Таблица 3. Матрица планирования ПФЭ 2³
Table 3. CFE Planning Matrix 2³

Номер эксперимента Experiment number	Исследуемые факторы Factors to be studied		
	z_1	z_2	z_3
1	+	+	+
2	-	+	+
3	+	-	+
4	-	-	+
5	+	+	-
6	-	+	-
7	+	-	-
8	-	-	-

⁵ Абашикин А.А., Карпов А.В., Ушаков Д.В., Фомин М.В., Гилетич А.Н., Комков П.М., Самошин Д.А. Пособие по применению «Методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности»: для определения расчетных значений пожарного риска в зданиях, строениях и сооружениях различных классов функциональной пожарной опасности». М.: ВНИИПО, 2014. 226 с.

⁶ Соколовская И.Ю. Полный факторный эксперимент // Методические указания для самостоятельной работы студентов. Новосибирск: НГАСУ, 2010. 36 с.

и связывающей эффективность ВОП с рассматриваемыми факторами, лежащими в интервале между верхним и нижним уровнями, осуществлялось по следующему алгоритму.

1. Все изучаемые факторы кодировались (табл. 4).

2. Для обработки полученных по результатам испытаний данных была построена матрица планирования в кодированных переменных с учетом парных взаимодействий (табл. 5).

3. Были вычислены коэффициенты уравнения регрессии b_i .

4. Вычисленные коэффициенты уравнения регрессии b_i были проверены на значимость, после чего было получено уравнение регрессии в кодированных переменных.

Проверка полученных коэффициентов на значимость проводилась с помощью критерия Стьюдента по условию: если $|b| < t_{кр} \cdot S_k$, то b незначим и его полагали равным нулю в уравнении регрессии. Критическую точку $t_{кр}$ находили из таблиц распределения Стьюдента [22] по числу степеней свободы $n(m-1)$ и с заданным уровнем значимости α для случая двухсторонней критической области.

Среднее квадратичное отклонение коэффициентов S_k вычислялось по формуле:

$$S_k = \sqrt{\frac{S_{\{y\}}^2}{nm}}. \quad (1)$$

Дисперсию воспроизводимости $S_{\{y\}}^2$ вычисляли по формуле:

$$S_{\{y\}}^2 = \frac{1}{n(m-1)} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (y_{ji} - \bar{y}_j)^2, \quad (2)$$

где n — число экспериментов (число строк в матрице ПФЭ);

Таблица 4. Кодирование факторов
Table 4. Coding factors

Факторы Factors	Верхний уровень z_i^+ Upper level z_i^+	Нижний уровень z_i^- Lower level z_i^-	Центр z_i^0 Center z_i^0	Интервал варьирования λ_i Variation interval λ_i	Зависимость кодированной переменной от натуральной Dependence of the encoded variable on the natural variable
z_1	z_1^+	z_1^-	z_1^0	λ_1	$x_1 = \frac{z_1 - z_1^0}{\lambda_1}$
z_2	z_2^+	z_2^-	z_2^0	λ_2	$x_2 = \frac{z_2 - z_2^0}{\lambda_2}$
z_3	z_3^+	z_3^-	z_3^0	λ_3	$x_3 = \frac{z_3 - z_3^0}{\lambda_3}$

Таблица 5. Матрица планирования для обработки результатов
Table 5. Planning matrix for processing the results

Номер эксперимента Experiment number	Факторы Factors			Взаимодействия Interaction				Результаты опытов Results of experiments			Среднее результатов Average results
	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	y_1	y_2	y_3	
1	+	+	+	+	+	+	+	y_{11}	y_{12}	y_{13}	$\bar{y}_1$
2	–	+	+	–	–	+	–	y_{21}	y_{22}	y_{23}	$\bar{y}_2$
3	+	–	+	–	+	–	–	y_{31}	y_{32}	y_{33}	$\bar{y}_3$
4	–	–	+	+	–	–	+	y_{41}	y_{42}	y_{43}	$\bar{y}_4$
5	+	+	–	+	–	–	–	y_{51}	y_{52}	y_{53}	$\bar{y}_5$
6	–	+	–	–	+	–	+	y_{61}	y_{62}	y_{63}	$\bar{y}_6$
7	+	–	–	–	–	+	+	y_{71}	y_{72}	y_{73}	$\bar{y}_7$
8	–	–	–	+	+	+	–	y_{81}	y_{82}	y_{83}	$\bar{y}_8$

m — число опытов (наблюдений) в каждом эксперименте;

y_{ji} — результат отдельного i -го наблюдения в j -м эксперименте;

$\bar{y}_j$ — среднее выборочное значение наблюдений для j -го эксперимента.

5. Полученное уравнение регрессии было проверено на адекватность.

Проверка на адекватность полученного уравнения регрессии со значимыми коэффициентами осуществлялась с помощью критерия Фишера по условию: если $F_{\text{рас}} < F_{\text{таб}}$, то уравнение адекватно, в противном случае — неадекватно.

Расчетное значение критерия $F_{\text{рас}}$ определили по формуле:

$$F_{\text{рас}} = \frac{S_{\text{ост}}^2}{S_{\{y\}}^2}, \quad (3)$$

где $S_{\text{ост}}^2$ — остаточная дисперсия;

$S_{\{y\}}^2$ — дисперсия воспроизводимости.

Остаточную дисперсию $S_{\text{ост}}^2$ вычисляли по формуле:

$$S_{\text{ост}}^2 = \frac{m}{n-r} \sum_{j=1}^n (\tilde{y}_j - \bar{y}_j)^2, \quad (4)$$

где m — число опытов в каждом эксперименте;

n — число экспериментов;

r — число значимых коэффициентов в уравнении регрессии;

$\tilde{y}_j$ — значение изучаемого параметра, вычисленное по уравнению регрессии со значимыми коэффициентами для j -го эксперимента;

$\bar{y}_j$ — среднее выборочное значение наблюдений для j -го эксперимента.

Табличное значение критерия Фишера $F_{\text{таб}}$ находили из таблиц критических точек распределения Фишера по заданному уровню значимости α и по соответствующим степеням свободы $k_1 = n - r$ и $k_2 = n(m - 1)$. Степень свободы k_1 соответствует степени свободы числителя формулы (3) — остаточной дисперсии $S_{\text{ост}}^2$, а k_2 — степень свободы знаменателя формулы (3) — дисперсии воспроизводимости $S_{\{y\}}^2$.

6. Была произведена интерпретация полученной математической модели.

Интерпретация полученной модели производилась в кодированных переменных, так как в этом случае на коэффициенты не влияет масштаб факторов и по величине коэффициентов можно судить о степени влияния того или иного фактора, т.е. чем больше абсолютная величина коэффициента, тем больше фактор влияет на изучаемый параметр. Следовательно, можно расположить факторы по величине их влияния. Знак «+» у коэффициента свидетельствует о том, что с увеличением значения фактора растет величина отклика, а при знаке «минус» — убывает.

7. Было получено уравнение регрессии в натуральных переменных.

Для получения математической модели в натуральных переменных z_i в уравнение регрессии вместо x_i подставляли их выражения из формул, указанных в табл. 3. При переходе к натуральным переменным коэффициенты уравнения изменяются, и в этом случае пропадает возможность интерпретации влияния факторов по величинам и знакам коэффициентов.



Рис. 2. Радиационная панель
Fig. 2. Radiant panel

Для оценки влияния теплового потока на характеристики вспучивающихся покрытий применялась радиационная панель (рис. 2), предназначенная для испытания строительных материалов на возгораемость с целью определения характеристики воспламенения строительных материалов по ГОСТ 9.402⁷.

Образцы, используемые для испытаний, представляют собой металлические пластины из углеродистой стали размерами 100 × 100 мм с приведенной толщиной 3 и 4,5 мм.

Поверхность металлических пластин перед окраской была подготовлена по ГОСТ 9.402⁴, а затем огрунтована. В качестве грунтовочного покрытия применялся грунт ГФ-021. Затем металлические пластины были окрашены вспучивающимся покрытием на органической основе толщиной 0,25 и 0,5 мм.

Для определения толщины мокрого слоя краски применялась прямоугольная металлическая гребенка (рис. 3). Для измерения толщины сухого слоя покрытия применялся магнитный толщиномер неразрушающего контроля ТМ-4 (рис. 4). Точки замеров толщины сухого слоя краски показаны на рис. 5.

Измерение толщины сухого слоя покрытия проводилось в 16 точках. За результат принималось среднее арифметическое значение всех измерений, которое определялось в соответствии с ГОСТ Р 53295 (с Изм. 1). При этом среднее квадратичное отклонение $S(\bar{X})$ не превышало 20 % от результатов измерений, а погрешность измерений не превышала $\pm 0,02T$, где T — измеряемая толщина покрытия.

Температура стальных образцов контролировалась двумя термопарами ТХА (К) № 1 и № 2 (рис. 6), установленными на необогреваемой поверхности. Относительно стальных образцов термопары были

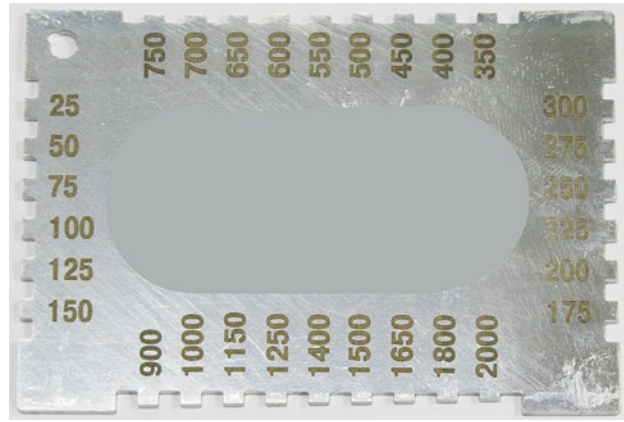


Рис. 3. Металлическая гребенка
Fig. 3. Metal comb



Рис. 4. Толщиномер покрытий ТМ-4
Fig. 4. Thickness gauge of coatings TM-4

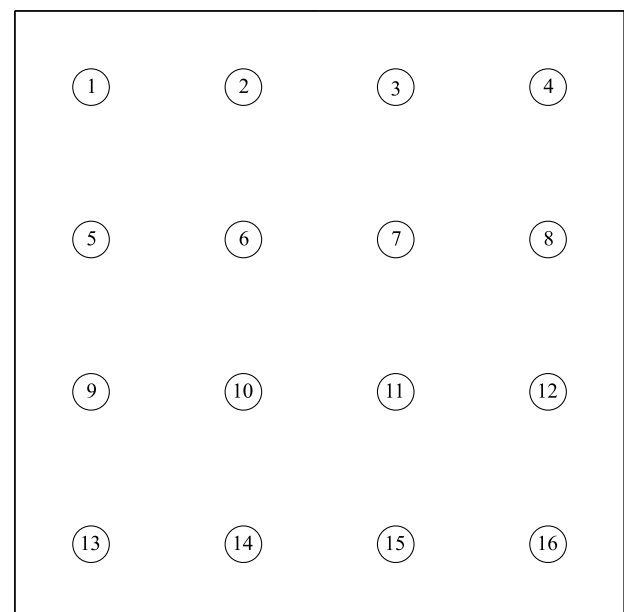


Рис. 5. Точки замеров толщины сухого слоя краски на образцах
Fig. 5. Points of measurement of the thickness of the dry layer of paint on the samples

⁷ ГОСТ 9.402. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Подготовка металлических поверхностей к окрашиванию.

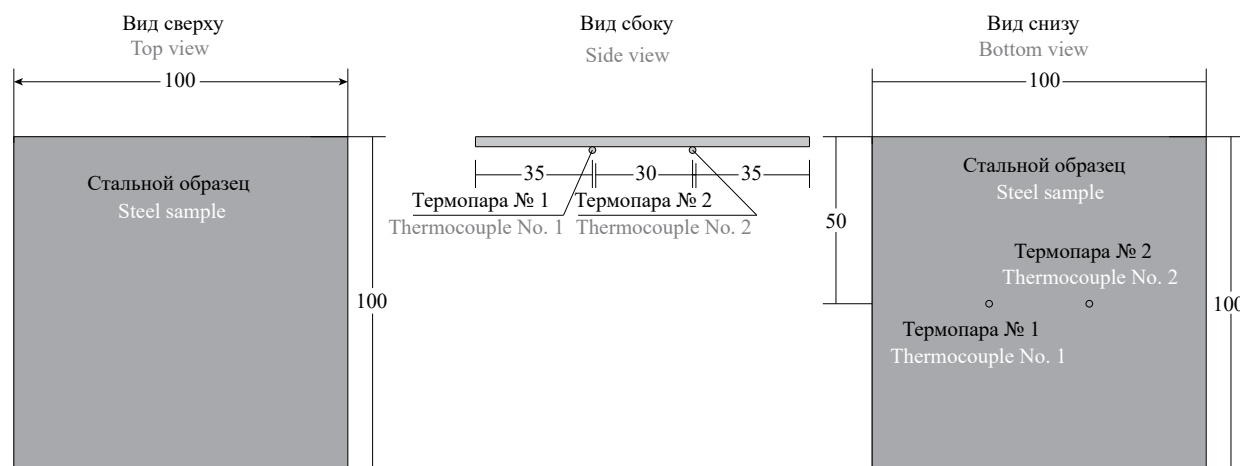


Рис. 6. Расположение термопар на стальных образцах

Fig. 6. Location of thermocouples on steel samples

размещены по центру на расстоянии 30 мм друг от друга.

Результаты и их обсуждение

Результаты численного моделирования температурного режима пожара в помещении представлены на рис. 7 и 8.

По результатам численного моделирования видно, что температурные режимы пожара могут значительно отличаться от стандартного температурного режима, а их влияние на эффективность ВОП не может быть оценено только по результатам

стандартных огневых испытаний без проведения дополнительных испытаний.

Результаты проведения экспериментов по плану полного факторного эксперимента 2^3 представлены в табл. 6.

Для каждого фактора были найдены интервалы варьирования и зависимость кодированной переменной x_i от натуральной z_i (табл. 7).

Матрица планирования обработки результатов представлена в табл. 8.

Полученные по результатам расчета коэффициенты уравнения регрессии представлены в табл. 9.

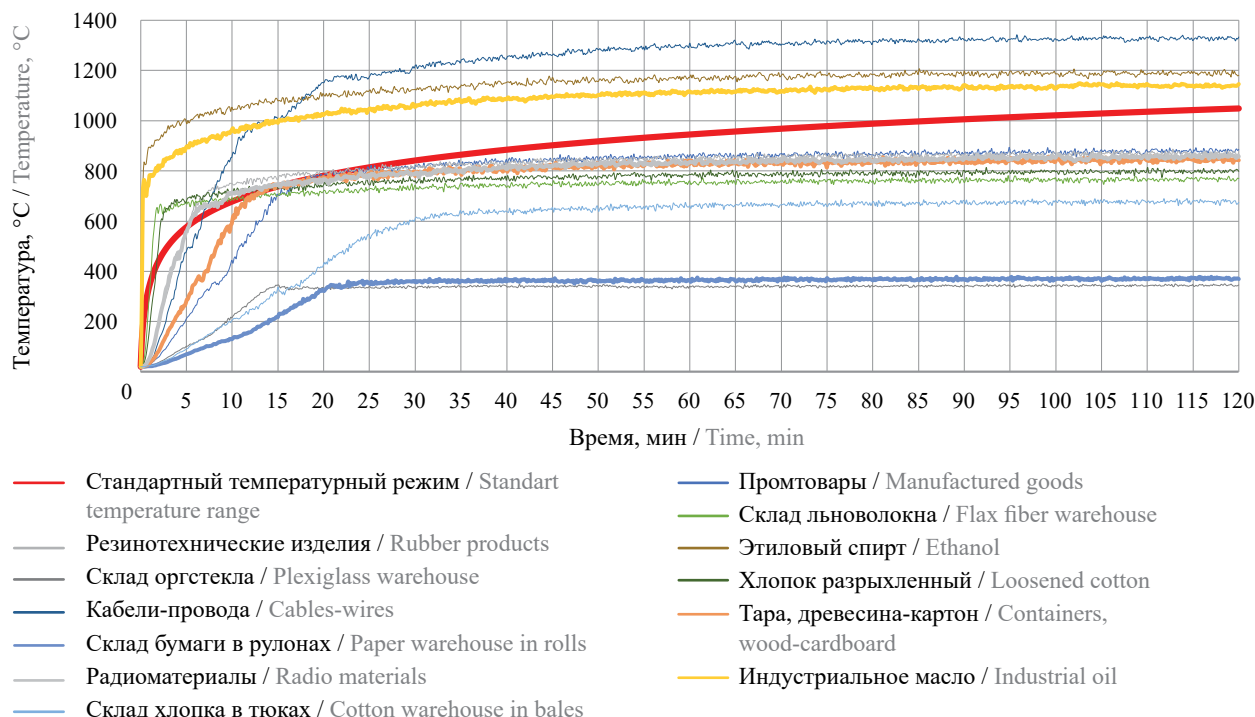


Рис. 7. Результаты численного моделирования температурного режима в помещении [21]

Fig. 7. Results of numerical simulation of the temperature regime in the room [21]

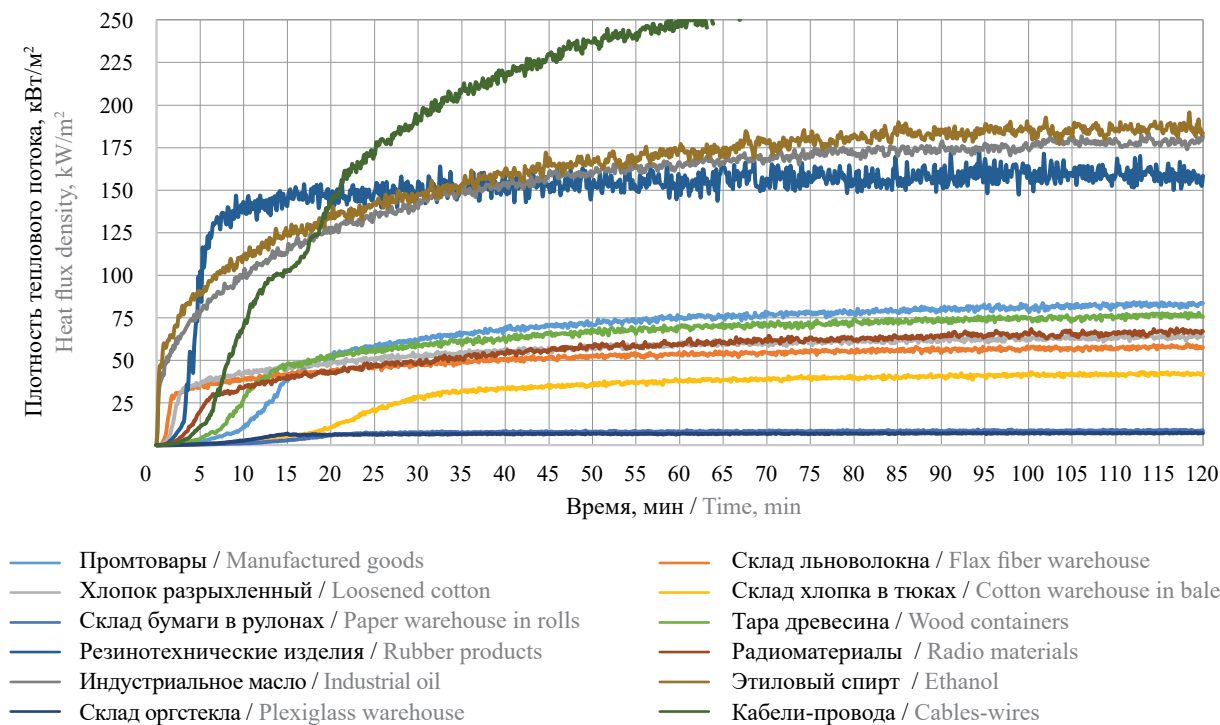


Рис. 8. Величина теплового потока, кВт/м², соответствующая полученным по результатам моделирования температурным режимам пожара [20]
Fig. 8. The value of the heat flux, kW/m², corresponding to the temperature conditions of the fire obtained from the results of the simulation [20]

Расчет выборочных дисперсий представлен в табл. 10.

Из таблиц распределения Стьюдента по числу степеней свободы $n(m - 1) = 8 \cdot 2 = 16$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$ $t_{кр} = 2,12$. Следовательно,

Таблица 6. Результаты экспериментов
Table 6. Results of experiments

Номер эксперимента Experiment number	Исзучаемые факторы Factors to be studied			Результаты опытов* Results of experiments*		
	z_1	z_2	z_3	y_1	y_2	y_3
1	+	+	+	58,3	56,1	61,4
2	-	+	+	87,1	91,3	89,2
3	+	-	+	50,3	49,2	48,5
4	-	-	+	80,1	78,4	77,1
5	+	+	-	26,2	24,6	25,7
6	-	+	-	59,8	57,1	58,3
7	+	-	-	18,7	19,4	20,5
8	-	-	-	55	56,8	54,2

* За результат эксперимента принималось время достижения металлической пластины температуры 500 °С на необогреваемой стороне.
* The time for the metal plate to reach 500 °C on the unheated side was taken as the result of the experiment.

$t_{кр}S_k = 2,12 \cdot 0,32 = 0,68$. Сравнение $t_{кр}S_k$ с коэффициентами уравнения регрессии представлено на рис. 9.

Сравнивая полученное значение $t_{кр}S_k = 0,68$ с коэффициентами уравнения регрессии, представленными на рис. 9, видим, что все коэффициенты, кроме $b_{1,2}$ и $b_{1,2,3}$, больше по абсолютной величине 0,68. Следовательно, все коэффициенты, кроме $b_{1,2}$ и $b_{1,2,3}$, значимы.

Таблица 7. Кодирование факторов
Table 7. Coding Factors

Факторы Factors	Верхний уровень z_i^+ Upper level z_i^+	Нижний уровень z_i^- Lower level z_i^-	Центр z_i^0 Center z_i^0	Интервал варьирования λ_i Variation interval λ_i	Зависимость кодированной переменной от натуральной Dependence of the encoded variable on the natural variable
z_1	50	40	45	5	$x_1 = \frac{z_1 - 45}{5}$
z_2	4,5	3	3,75	0,75	$x_2 = \frac{z_2 - 3,75}{0,75}$
z_3	0,5	0,25	0,375	0,125	$x_3 = \frac{z_3 - 0,375}{0,125}$

Таблица 8. Матрица планирования для обработки результатов
Table 8. Planning matrix for processing results

Номер эксперимента Experiment number	Факторы Factors			Взаимодействия Interaction				Результаты опытов Results of experiments			Среднее результатов Average results
	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	y_1	y_2	y_3	$\bar{y}_j$
1	+	+	+	+	+	+	+	58,3	56,1	61,4	58,60
2	–	+	+	–	–	+	–	87,1	91,3	89,2	89,20
3	+	–	+	–	+	–	–	50,3	49,2	48,5	49,33
4	–	–	+	+	–	–	+	80,1	78,4	77,1	78,53
5	+	+	–	+	–	–	–	26,2	24,6	25,7	25,50
6	–	+	–	–	+	–	+	59,8	57,1	58,3	58,40
7	+	–	–	–	–	+	+	18,7	19,4	20,5	19,53
8	–	–	–	+	+	+	–	55,2	56,8	54,2	55,40

Полагая $b_{1,2} = 0$ и $b_{1,2,3} = 0$, получаем уравнение регрессии в кодированных переменных:

$$y = 54,31 - 16,07x_1 + 3,61x_2 + 14,6x_3 + 1,12x_1x_3 + 1,37x_2x_3. \quad (5)$$

Проверка на адекватность полученного уравнения регрессии со значимыми коэффициентами осуществлялась с помощью критерия Фишера. Табличное значение критерия Фишера $F_{\text{таб}}$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$ по соответству-

Таблица 9. Коэффициенты уравнения регрессии
Table 9. Regression equation coefficients

b_0	b_1	b_2	b_3	$b_{1,2}$	$b_{1,3}$	$b_{2,3}$	$b_{1,2,3}$
54,31	–16,07	3,61	14,60	0,20	1,12	1,37	–0,55

ющим степеням свободы $k_1 = n - r = 8 - 6 = 2$ и $k_2 = n(m - 1) = 8(3 - 1) = 16$ составляет 3,63.

Определение расчетного значения критерия Фишера представлено в табл. 11.

Так как $F_{\text{рас}} = 1,64 < F_{\text{таб}} = 3,63$, то полученное уравнение регрессии (5) адекватно.

По полученному уравнению регрессии (5) видно, что наиболее сильное влияние оказывает фактор x_1 (величина теплового потока), так как он имеет наибольший по абсолютной величине коэффициент (–16,07). После него по силе влияния на эффективность ВОП идут: толщина ВОП (14,6); приведенная толщина металла (3,61); взаимодействие факторов: приведенная толщина металла и толщина ВОП (1,37); взаимодействие факторов: величина теплового потока и толщина ВОП (1,12). Так как коэффициенты x_2 , x_3 , x_1x_3 , x_2x_3 — положительны, то с увеличением этих факторов и их взаимодействий увеличивается время прогрева опытных образцов до температуры 500 °С. Коэффициент

Таблица 10. Расчет выборочных дисперсий
Table 10. Calculation of sample variances

j	y_1	y_2	y_3	$y_{\text{ср}}$ y_{med}	$(y_1 - y_{\text{ср}})^2$ $(y_1 - y_{\text{med}})^2$	$(y_2 - y_{\text{ср}})^2$ $(y_2 - y_{\text{med}})^2$	$(y_3 - y_{\text{ср}})^2$ $(y_3 - y_{\text{med}})^2$	S_j^2	ΣS_j^2	S_{y_2}	S_{y_3}
1	58,3	56,1	61,4	58,60	0,0900	6,2500	7,8400	7,09000	19,63	2,45	0,32
2	87,1	91,3	89,2	89,20	4,4100	4,4100	0,0000	4,41000			
3	50,3	49,2	48,5	49,33	0,9344	0,0178	0,6944	0,82333			
4	80,1	78,4	77,1	78,53	2,4544	0,0178	2,0544	2,26333			
5	26,2	24,6	25,7	25,50	0,4900	0,8100	0,0400	0,67000			
6	59,8	57,1	58,3	58,40	1,9600	1,6900	0,0100	1,83000			
7	18,7	19,4	20,5	19,53	0,6944	0,0178	0,9344	0,82333			
8	55,2	56,8	54,2	55,40	0,0400	1,9600	1,4400	1,72000			

Таблица 11. Расчетное значение критерия Фишера $F_{\text{рас}}$
 Table 11. Calculated value of the Fisher criterion F_{est}

Параметр Parameter	Значение параметра Parameter value	Параметр Parameter	Значение параметра Parameter value	Параметр Parameter	Значение параметра Parameter value	$S_{\text{ост}}^2$ $S_{r,d}^2$	$F_{\text{рас}}$ F_{est}
$\tilde{y}_1$	58,95	$\bar{y}_1$	58,60	$(\tilde{y}_1 - \bar{y}_1)^2$	0,1225	4,04	1,64
$\tilde{y}_2$	88,85	$\bar{y}_2$	89,20	$(\tilde{y}_2 - \bar{y}_2)^2$	0,1225		
$\tilde{y}_3$	48,98	$\bar{y}_3$	49,33	$(\tilde{y}_3 - \bar{y}_3)^2$	0,1225		
$\tilde{y}_4$	78,88	$\bar{y}_4$	78,53	$(\tilde{y}_4 - \bar{y}_4)^2$	0,1225		
$\tilde{y}_5$	24,76	$\bar{y}_5$	25,50	$(\tilde{y}_5 - \bar{y}_5)^2$	0,5501		
$\tilde{y}_6$	59,14	$\bar{y}_6$	58,40	$(\tilde{y}_6 - \bar{y}_6)^2$	0,5501		
$\tilde{y}_7$	20,28	$\bar{y}_7$	19,53	$(\tilde{y}_7 - \bar{y}_7)^2$	0,5501		
$\tilde{y}_8$	54,66	$\bar{y}_8$	55,40	$(\tilde{y}_8 - \bar{y}_8)^2$	0,5501		

x_1 — отрицательный, это означает, что с увеличением фактора x_1 время прогрева опытных образцов уменьшается.

Для получения математической модели в натуральных переменных z_i в уравнение регрессии (5) вместо x_i подставляли их выражения из формул, указанных в табл. 7. Полученное уравнение регрессии в натуральных переменных:

$$y = 54,31 - 16,07 \frac{z_1 - 45}{5} + 3,61 \frac{z_2 - 3,75}{0,75} + 14,6 \frac{z_3 - 0,37}{0,125} + 1,12 \frac{z_1 - 45}{5} \cdot \frac{z_3}{0,125} + 1,37 \frac{z_2 - 3,75}{0,75} \cdot \frac{z_3 - 0,4}{0,125}. \quad (6)$$

По полученному уравнению регрессии (6) можно определить значения времени прогрева стальных пластин до 500 °С, не проводя эксперимента и придавая факторам (величина теплового потока, приведенная толщина металла, толщина краски) значения, которые должны лежать между нижним и верхним уровнем.

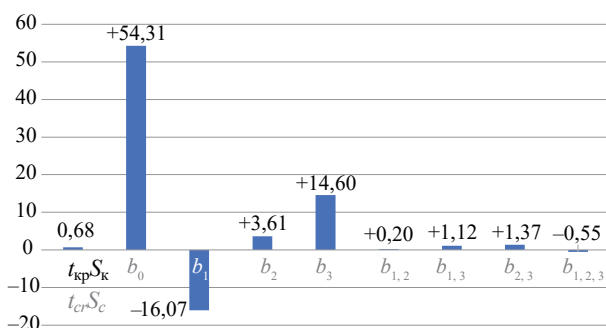


Рис. 9. Коэффициенты уравнения регрессии в сравнении с $t_{kp}S_k$
 Fig. 9. Coefficients of the regression equation in comparison with $t_{cr}S_c$

Выводы

В ходе проведения численных экспериментов в программном комплексе FDS установлено, что тепловое воздействие, оказываемое на стальные строительные конструкции во время пожара, может существенно отличаться от стандартного температурного режима как в большую, так и в меньшую сторону.

Оценка влияния температурного режима пожара на эффективность ВОП показала, что величина теплового потока при проведении испытаний оказала наибольшее влияние на время прогрева стальных пластин. Так, по полученному уравнению регрессии (5) видно, что фактор x_1 (величина теплового потока) имеет наибольший по абсолютной величине коэффициент (–16,07). После него по силе влияния на эффективность ВОП идут: толщина ВОП (14,6); приведенная толщина металла (3,61); взаимодействие факторов: приведенная толщина металла и толщина ВОП (1,37); взаимодействие факторов: величина теплового потока и толщина ВОП (1,12). Так как коэффициенты x_2 , x_3 , x_1x_3 , x_2x_3 — положительны, то с увеличением этих факторов и их взаимодействий увеличивается время прогрева опытных образцов до температуры 500 °С. Коэффициент x_1 — отрицательный, это означает, что с увеличением фактора x_1 время прогрева опытных образцов уменьшается.

Из полученных результатов исследования можно сделать вывод, что проводимая при проектировании оценка соответствия пределов огнестойкости стальных строительных конструкций с ВОП, требуемым Федеральным законом № 123-ФЗ⁸, при стандартном температурном режиме без учета особенности

⁸ Технический регламент о требованиях пожарной безопасности от 22.07.2008 № 123-ФЗ.

пожарной нагрузки и зависимости эффективности ВОП от величины теплового потока в ряде случаев может привести к недооценке теплового воздействия

и занижению фактической огнестойкости, что отрицательно сказывается на пожарной безопасности складских зданий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Голованов В.И., Пехотиков А.В., Павлов В.В. Обзор рынка средств огнезащиты металлоконструкций. Преимущества и недостатки различных видов // Огнезащита XXI века : мат. Всеросс. науч.-практ. конф. М., 2014.
2. Пехотиков А.В. и др. Актуальные вопросы применения средств огнезащиты для стальных конструкций // Евростройпрофи. 2015. № 79. С. 34–38.
3. Garlock M., Kruppa J., Li G.-Q., Zhao B. White paper on fire behavior of steel structures / NIST GCR 15-984. Gaithersburg, Maryland : NIST, 2014. 20 p. DOI: 10.6028/nist.gcr.15-984
4. Lucherini A., Giuliani L., Jomaas G. Experimental study of the performance of intumescent coatings exposed to standard and non-standard fire conditions // Fire Safety Journal. 2018. Vol. 95. Pp. 42–50. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.10.004
5. De Masi R.F., Ruggiero S., Vanoli G.P. Acrylic white paint of industrial sector for cool roofing application: Experimental investigation of summer behavior and aging problem under Mediterranean climate // Solar Energy. 2018. Vol. 169. Pp. 468–487. DOI: 10.1016/j.solener.2018.05.021
6. Golovanov V., Kryuchkov G. Steel structures fire resistance assessment under standardized fire temperature regimes // Fires and Incidents: Prevention, Accident Response. 2021. Vol. 3. Pp. 52–60. DOI: 10.25257/FE.2021.3.52-60
7. Carreras Guzman N.H., Kozine I., Lundteigen M.A. An integrated safety and security analysis for cyber-physical harm scenarios // Safety Science. 2021. Vol. 144(0925). P. 105458. DOI: 10.1016/j.ssci.2021.105458
8. Siddiqui A.A., Ewer J.A., Lawrence P.J., Galea E.R., Frost I.R. Building information modelling for performance-based fire safety engineering analysis — A strategy for data sharing // Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 42. P. 102794. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.102794
9. Smith T.D., DeJoy D.M., Dyal M.A., Pu Y., Dickinson S. Multi-level safety climate associations with safety behaviors in the fire service // Journal of Safety Research. 2019. Vol. 69. Pp. 53–60. DOI: 10.1016/j.jsr.2019.02.005
10. Li P., Liu C., Wang B., Tao Y., Xu Y.-J., Liu Y., Zhu P. Eco-friendly coating based on an intumescent flame-retardant system for viscose fabrics with multi-function properties: Flame retardancy, smoke suppression, and antibacterial properties // Progress in Organic Coatings. 2021. Vol. 159. Issue 10. P. 106400. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2021.106400
11. Morandini F., Santoni P.A., Tramoni J.B., Mell W.E. Experimental investigation of flammability and numerical study of combustion of shrub of rock-rose under severe drought conditions // Fire Safety Journal. 2019. Vol. 108. DOI: 10.1016/j.firesaf.2019.102836
12. Zhang T., Xi J., Qiu S., Zhang B., Luo Z., Xing W., et al. Facilely produced highly adhered, low thermal conductivity and non-combustible coatings for fire safety // Journal of Colloid and Interface Science. 2021. Vol. 604. Pp. 378–389. DOI: 10.1016/j.jcis.2021.06.135
13. Siddiqui A.A., Ewer J.A., Lawrence P.J., Galea E.R., Frost I.R. Building Information Modelling for performance-based Fire Safety Engineering analysis — A strategy for data sharing // Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 42. P. 102794. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.102794
14. Li P., Liu C., Wang B., Tao Y., Xu Y.-J., Liu Y., Zhu P. Eco-friendly coating based on an intumescent flame-retardant system for viscose fabrics with multi-function properties: Flame retardancy, smoke suppression, and antibacterial properties // Progress in Organic Coatings. 2021. Vol. 159. Issue 10. P. 106400. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2021.106400
15. Gatheeshgar P., Keerthan P., Thamboo J., Roy K. On the fire behaviour of modular floors designed with optimised cold-formed steel joist // Structures. 2021. Vol. 30. Pp. 1071–1085. DOI: 10.1016/j.jistruc.2021.01.055
16. Roy K., Lim J.B.P., Lau H.H., Yong P.M., Clifton G.C., Johnston P.D., et al. Collapse behaviour of a fire engineering designed single-storey cold-formed steel building in severe fires // Thin-Walled Structures. 2019. Vol. 142. Pp. 340–357. DOI: 10.1016/j.tws.2019.04.046
17. Kumar A., Roy K., Uzzaman A., Lim J.B.P. Finite element analysis of unfastened cold-formed steel channel sections with web holes under end-two-flange loading at elevated temperatures // Advanced Steel Construction 2021. Vol. 17. Issue 3. Pp. 231–242.
18. Ерёмкина Т.Ю., Минайлов Д.А. Гармонизация российских и международных нормативных документов по оценке огнестойкости строительных конструкций (основные подходы к проведению огневых испытаний) // Пожарная безопасность. 2014. № 2. С. 151–155.
19. Korolchenko D., Eremina T., Minailov D. New method for quality control of fire protective coatings IAPF'19. Oxford, United Kingdom.

20. Минайлов Д.А. Исследование огнестойкости стальных конструкций покрытия складских зданий в условиях различного температурного воздействия // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 3. С. 54–65. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.03.54-65
21. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении : учеб. пос. М. : Академия ГПС МВД России, 2000. 118 с.
22. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика : учеб. пос. для вузов. 10-е изд., стер. М. : Высшая школа, 2004. 479 с.

REFERENCES

1. Golovanov V.I., Pekhotikov A.V., Pavlov V.V. Obzor grazhnoezaschita flaevozaschitametallokonstruktsii. Advantages and disadvantages of various types. *Fire Protection of the XXI Century : Materials of the All-Russian Scientific Practical Conference*. Moscow, 2014. (rus).
2. Pekhotikov A.V., et al. Topical issues in changes means of fire protection for steel constructures. *Eurostroyprofi*. 2015; 79:34-38.
3. Garlock M., Kruppa J., Li G.-Q., Zhao B. *White paper on fire behavior of steel structures / NIST GCR 15-984*. Gaithersburg, Maryland, NIST Publ., 2014; 20. DOI: 10.6028/nist.gcr.15-984
4. Lucherini A., Giuliani L., Jomaas G. Experimental study of the performance of intumescent coatings exposed to standard and non-standard fire conditions. *Fire Safety Journal*. 2018; 95:42-50. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.10.004
5. De Masi R.F., Ruggiero S., Vanoli G.P. Acrylic white paint of industrial sector for cool roofing application: Ex-perimental investigation of summer behavior and aging problem under Mediterranean climate. *Solar Energy*. 2018; 169:468-487. DOI: 10.1016/j.solener.2018.05.021
6. Golovanov V., Kryuchkov G. Steel structures fire resistance assessment under standardized fire temperature regimes. *Fires and Incidents: Prevention, Accident Response*. 2021; 3:52-60. DOI: 10.25257/FE.2021.3.52-60
7. Carreras Guzman N.H., Kozine I., Lundteigen M.A. An integrated safety and security analysis for cyber-physical harm scenarios. *Safety Science*. 2021; 144(0925):105458. DOI: 10.1016/j.ssci.2021.105458
8. Siddiqui A.A., Ewer J.A., Lawrence P.J., Galea E.R., Frost I.R. Building Information Modelling for performance-based Fire Safety Engineering analysis — A strategy for data sharing. *Journal of Building Engineering*. 2021; 42:102794. DOI: 10.1016/j.job.2021.102794
9. Smith T.D., DeJoy D.M., Dyal M.A., Pu Y., Dickinson S. Multi-level safety climate associations with safety behaviors in the fire service. *Journal of Safety Research*. 2019; 69:53-60. DOI: 10.1016/j.jsr.2019.02.005
10. Li P., Liu C., Wang B., Tao Y., Xu Y.-J., Liu Y., Zhu P. Eco-friendly coating based on an intumescent flame-retardant system for viscose fabrics with multi-function properties: Flame retardancy, smoke suppression, and antibacterial properties. *Progress in Organic Coatings*. 2021; 159(10):106400. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2021.106400
11. Morandini F., Santoni P.A., Tramoni J.B., Mell W.E. Experimental investigation of flammability and numerical study of combustion of shrub of rockrose under severe drought conditions. *Fire Safety Journal*. 2019; 108. DOI: 10.1016/j.firesaf.2019.102836
12. Zhang T., Xi J., Qiu S., Zhang B., Luo Z., Xing W., et al. Facilely produced highly adhered, low thermal conductivity and non-combustible coatings for fire safety. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2021; 604:378-389. DOI: 10.1016/j.jcis.2021.06.135
13. Siddiqui A.A., Ewer J.A., Lawrence P.J., Galea E.R., Frost I.R. Building Information Modelling for performance-based Fire Safety Engineering analysis — A strategy for data sharing. *Journal of Building Engineering*. 2021; 42:102794. DOI: 10.1016/j.job.2021.102794
14. Li P., Liu C., Wang B., Tao Y., Xu Y.-J., Liu Y., Zhu P. Eco-friendly coating based on an intumescent flame-retardant system for viscose fabrics with multi-function properties: Flame retardancy, smoke suppression, and antibacterial properties. *Progress in Organic Coatings*. 2021; 159(10):106400. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2021.106400
15. Gatheeshgar P., Keerthan P., Thamboo J., Roy K. On the fire behaviour of modular floors designed with optimised cold-formed steel joist. *Structures*. 2021; 30:1071-1085. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.01.055
16. Roy K., Lim J.B.P., Lau H.H., Yong P.M., Clifton G.C., Johnston P.D., et al. Collapse behaviour of a fire engineering designed single-storey cold-formed steel building in severe fires. *Thin-Walled Structures*. 2019; 142:340-357. DOI: 10.1016/j.tws.2019.04.046
17. Kumar A., Roy K., Uzzaman A., Lim J.B.P. Finite element analysis of unfastened cold-formed steel channel sections with web holes under end-two-flange loading at elevated temperatures. *Advanced Steel Construction*. 2021; 17(3):231-242.
18. Eremina T.Y., Minailov D.A. Harmonization of the Russian and international normative documents on assessment of fire resistance of structures (key approaches to carrying out fire tests). *Fire safety*. 2014; 32:151-155. (rus).
19. Korolchenko D., Eremina T., Minailov D. *New method for quality control of fire protective coatings IAPF'19*. Oxford, United Kingdom.

20. Minailov D.A. Investigation of fire resistance of steel structures covering warehouse buildings in conditions of different temperature effects. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(3): 54-65. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.03.54-65 (rus).
21. Koshmarov Y.A. *Predicting indoor fire hazards : a training manual*. Moscow, Academy of State Fire Service of Emercom of Russia, 2000; 118. (rus).
22. Gmurman V.E. *Probability theory and mathematical statistics : studies. Manual for universities. 10th ed., ster.* Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2004; 479. (rus).

Поступила 15.11.2022, после доработки 26.01.2023;

принята к публикации 10.02.2023

Received November 15, 2022; Received in revised form January 26, 2023;

Accepted February 10, 2023

Информация об авторах

ЕРЕМИНА Татьяна Юрьевна, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 274777; Scopus AuthorID: 56893573700; ORCID: 0000-0003-1427-606X; e-mail: main@stopfire.ru

МИНАЙЛОВ Денис Александрович, начальник сектора, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; РИНЦ ID: 1128904; Scopus AuthorID: 57207307581; ResearcherID: AAI-2064-2020; ORCID: 0000-0001-9811-3908; e-mail: minailov-denis@mail.ru

Вклад авторов:

Еремина Т.Ю. — научное руководство, концепция исследования.

Минайлов Д.А. — проведение исследования, написание исходного текста и доработка текста статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Tatyana Yu. EREMINA, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of Integrated Safety in Civil Engineering, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 274777; Scopus AuthorID: 56893573700; ORCID: 0000-0003-1427-606X; e-mail: main@stopfire.ru

Denis A. MINAILOV, Head of the Research Sector, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RISC: 1128904, Scopus AuthorID: 57207307581; ResearcherID: AAI-2064-2020; ORCID: 0000-0001-9811-3908, e-mail: minailov-denis@mail.ru

Contributions of the authors:

Tatyana Yu. Eremina — scientific guidance, research concept.

Denis A. Minailov — research, writing the source text and finalizing the text of the article.

The authors declare no conflicts of interests.